نشریهٔ علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
سال سی و دوم، شمارهٔ دو، ۱۴۰۰ (۲۰۱-۲۱۶)
DOI: 10.22067/jacsm.2021.72060.1052

# تعیین الگوریتم بهینهٔ پنل اولویت‌بندی جایگاه سوخت‌رسانی CNG برای کاهش هزینهٔ انرژی*

**مقاله پژوهشی**

مرتضی سعادت طرقی(۱) جواد خادم(۲) محمود فرزانه‌گرد(۳)

**چکیده** *فرایند پرشدن سریع، فرایند اصلی است که در جایگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده رخ می‌دهد. هدف اصلی این تحقیق دستیابی به یک آنالیز ترمودینامیکی دقیق‌تر برای مدل سازی جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده با چندین سوخت‌گیری متوالی است. نتایج آنالیز ترمودینامیکی با نتایج تجربی و نتایج تحقیقات قبلی مقایسه شده است. برای محاسبه خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی فشرده از معادلهٔ حالت AGA8 استفاده شده است. تحقیقات مختلفی دربارهٔ مدل‌سازی ترمودینامیکی جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده وجود دارد، اما در آن‌ها هیچ اشاره‌ای به انتخاب الگوریتم بهینه در پنل اولویت‌بندی نشده است. ۳تابع هدف کمینه‌کردن زمان سوخت‌گیری، بیشینه‌کردن جرم ذخیره‌شده و کمینه‌کردن میانگین مصرف انرژی مخصوص، برای مسئلهٔ بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. سرانجام الگوریتم بهینه پنل اولویت‌بندی به‌عنوان هدف اصلی این تحقیق تعیین و نتایج نهایی بهینه‌سازی ارائه شده است. دستیابی به مدل‌سازی دقیق‌تر و مدل‌سازی فرایند چندین سوخت‌گیری متوالی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق است. الگوریتم PPM225 به‌عنوان الگوریتم بهینهٔ پنل اولویت‌بندی انتخاب شد و برای نشان‌دادن بهتر نتایج، تحلیلی اقتصادی انجام شده است. نتایج این تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که با اعمال الگوریتم بهینه می‌توان در یک سال ۶۵،۷۰۰میلیون ریال (۴۳۸،۰۰۰،۰۰کیلووات‌ساعت) صرفه‌جویی کرد.*

**واژه‌های کلیدی** مدل‌سازی، گاز طبیعی، پرشدن سریع، بهینه‌سازی

## مقدمه

استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودرو دارای مزیت‌هایی از جمله ارزان‌بودن، میزان آلایندگی کمتر و دسترس‌پذیری بیشتر نسبت به سوخت بنزین است. استفاده از گازهای مختلف (هیدروژن و گاز طبیعی) به‌عنوان سوخت جایگزین برای خودروها، سال‌هاست که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. لازمهٔ استفاده از این سوخت‌های پاک و ارزان، طراحی و احداث جایگاه‌های سوخت‌رسانی است. فرایند اصلی که در این جایگاه‌ها رخ می‌دهد، فرایند پرشدن سریع است. اساس کار فرایند پرشدن سریع به این ترتیب است که ابتدا گاز طبیعی فشرده از طریق کمپرسور در مخازن ذخیرهٔ جایگاه، تا فشار ۲۳۵بار ذخیره می‌شود. سپس به‌وسیلهٔ لوله‌های ارتباطی و سایر تجهیزات جایگاه (مانند پنل اولویت‌بندی و توزیع‌کننده) به مخزن خودرو منتقل می‌شود که این همان فرایند پرشدن سریع است. در تحلیل عملکرد یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی ۲هدف کاهش کار مصرفی کمپرسور و کاهش زمان سوخت‌گیری مطرح است. لازمهٔ تحلیل عملکرد، انجام یک شبیه‌سازی دقیق است که قابل اعتبارسنجی با نتایج تجربی باشد.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۳۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۷/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین
Email: MSaadat@esfarayen.ac.ir
(۲) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
(۳) استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

در موضوع تحلیل جایگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی تاکنون تحقیقات مختلفی انجام شده است که در بیشتر آن‌ها فقط به بررسی فرایند پرشدن سریع پرداخته شده است. مدل‌سازی فرایند پرشدن سریع را نخستین‌بار کونتز [1] در سال ۱۹۹٤ انجام داده است. باتوجه‌به این‌که در این مدل ترمودینامیکی فقط مخزن خودرو مدل‌سازی شده است، از نتایج این مدل‌سازی نمی‌توان در شبیه‌سازی کلی جایگاه استفاده کرد، زیرا شبیه‌سازی جایگاه مستلزم مدل‌سازی سایر متعلقات جایگاه نیز می‌شود. در سال۲۰۰۸ فرزانه‌گرد و همکاران [2] تأثیر شرایط اولیهٔ مخزن خودرو (فشار و دما) بر شرایط نهایی مخزن خودرو و زمان سوخت‌گیری را بررسی کردند. همچنین در تحقیق دیگری فرزانه‌گرد و همکاران [3] در سال۲۰۱۱ به مقایسهٔ ۲نوع سیستم ذخیرهٔ آبشاری و بافر پرداختند. مدل‌سازی صورت‌گرفته برمبنای مدل گاز واقعی بوده و مشابه تحقیقات قبلی آن‌ها فقط به مدل‌سازی مخزن خودرو پرداخته شده و از مدل‌سازی تغییرات مخازن جایگاه و سایر متعلقات صرف‌نظر شده است. در تحقیق‌های آن‌ها شرایط مخازن جایگاه ثابت در نظر گرفته شده است. در تحقیق یادشده مقدار آنتروپی تولیدی به‌عنوان معیاری برای محاسبهٔ کار کمپرسور در نظر گرفته شد. با وجود این‌که مقدار کار کمپرسور به‌صورت مستقیم محاسبه نشده بود، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار آنتروپی تولیدی در سیستم ذخیرهٔ آبشاری حدود ٥٥درصد کمتر از سیستم ذخیرهٔ بافر است. فرزانه‌گرد و همکاران [4, 5] در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ با استفاده از مدل‌های قبلی‌شان به بهینه‌سازی یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی پرداختند. مدل‌سازی آن‌ها برمبنای مدل گاز ایدئال صورت گرفته است و همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، فقط فرایند پرشدن سریع بهینه‌سازی شده است و نه همهٔ جایگاه. در موردی مشابه، خام‌فروش و همکاران [6] در سال۲۰۱٤ نیز پیشنهادهایی برای بهینه‌سازی فرایند پرشدن سریع ارائه کردند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تحقیقات کمی در زمینهٔ مدل‌سازی فرایند پرشدن سریع با درنظرگرفتن مخزن خودرو و مخازن جایگاه انجام شده است. دیمی و همکاران [7] در سال۲۰۱۲ در تحقیقی برای نخستین‌بار به بررسی تغییرات شرایط مخازن جایگاه در فرایند پرشدن مخزن خودرو پرداختند. مدل‌سازی مخازن جایگاه به‌عنوان نوآوری کار آن‌ها نسبت به تحقیق‌های قبلی گزارش شده است. باتوجه‌به عدم مدل‌سازی لوله‌های ارتباطی بین مخازن، در تعیین مقدار صحیح دبی جرمی خطای زیادی مشاهده شده است. مشاهده لزوم مدل‌سازی لوله‌های ارتباطی در فرایند پرشدن سریع باعث شد که برای نخستین‌بار مدل‌سازی لوله‌ها را خادم و همکاران [8] در سال۲۰۱۵ گزارش کنند. در تحقیق آن‌ها شرایط مخازن جایگاه ثابت در نظر گرفته شده و همچنین برای ساده‌سازی از مدل گاز ایدئال استفاده شده است. نکته قابل توجه در تحقیق آن‌ها مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی برای نخستین مرتبه است. در یکی‌دیگر از تحقیق‌های مربوط به مدل‌سازی جایگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی، سعادت و همکاران [9] در سال۲۰۱٦ به آنالیز ترمودینامیکی یک جایگاه با درنظرگرفتن کمپرسور آن پرداختند. در مدل‌سازی آن‌ها لوله‌های ارتباطی با درنظرگرفتن اصطکاک تحلیل شده و همچنین برخلاف تحقیق قبلی، تغییرات شرایط مخازن ذخیرهٔ جایگاه در نظر گرفته شده است. در تحقیق آن‌ها برای نشان‌دادن تأثیر ارتقای مدل‌سازی، نتایج با نتایج کارهای قبلی [3,8] مقایسه شده است. از دیگر نوآوری‌های کار آن‌ها مدل‌سازی کمپرسور و تعیین کار مصرفی کمپرسور و همچنین دبی جرمی آن در شرایط عملکرد ناپایا است. آن‌ها نشان دادند که تغییر فشار خروجی کمپرسور بر دبی جرمی خروجی از کمپرسور تأثیری ندارد و همچنین تغییرات فشار خروجی کمپرسور (مخازن ذخیرهٔ جایگاه) بر مقدار فشارهای میانی کمپرسور بدون تأثیر است. البته نتایج آن‌ها در شرایطی که هنگام تخلیهٔ مخازن، کمپرسور خاموش باشد، ارائه شده است. این درحالی است که

تقریبا در بیشتر مواقع هنگام تخلیهٔ مخازن جایگاه، کمپرسور روشن است و مخازن نیز پر می‌شوند. کجیری و همکاران در سال ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ [10,11] برنامه‌ای برای بهره‌برداری کمپرسور با هدف کاهش هزینه‌های سوخت‌گیری ارائه کردند. در تحقیق آن‌ها عملکرد پنل اولویت‌بندی و توزیع‌کننده در نظر گرفته نشده است و همچنین اطلاعاتی دربارهٔ نحوهٔ مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل‌سازی ارائه نشده است. پیشنهادهای آن‌ها صرفا برمبنای روشن و خاموش‌شدن کمپرسور در یک جایگاه سوخت‌رسانی مشخص است و نمی‌تواند به‌عنوان مبنای عملکرد در سایر جایگاه‌ها قرار گیرد. در یکی از آخرین تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی جایگاه‌های گاز طبیعی فشرده، فرزانه‌گرد و همکاران [12] در سال ۲۰۱۷ نسبت حجم‌های بهینه را برای مخازن ذخیرهٔ جایگاه تعیین کردند. در تحقیق آن‌ها نسبت بهره‌برداری، زمان سوخت‌گیری و مقدار جرم سوخت‌گیری به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است. با درنظرگرفتن این توابع هدف، مقادیر نسبت حجم‌های بهینه تعیین شده است. لازم به ذکر است که در تحقیق آن‌ها برای تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی برمبنای مدل گاز واقعی از معادلهٔ حالت AGA8 استفاده شده است.

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقی که یک شبیه‌سازی کامل و منطبق بر شرایط واقعی جایگاه را بیان کند، ارائه نشده است. همچنین مطالعه‌ای در زمینه مدل‌سازی پنل اولویت‌بندی در جایگاه‌های گاز طبیعی فشرده تاکنون گزارش نشده است. باتوجه‌به عدم مدل‌سازی، نتایج مربوط به بهینه‌سازی مرتبط با پنل‌های اولویت‌بندی نیز تاکنون گزارش نشده است.

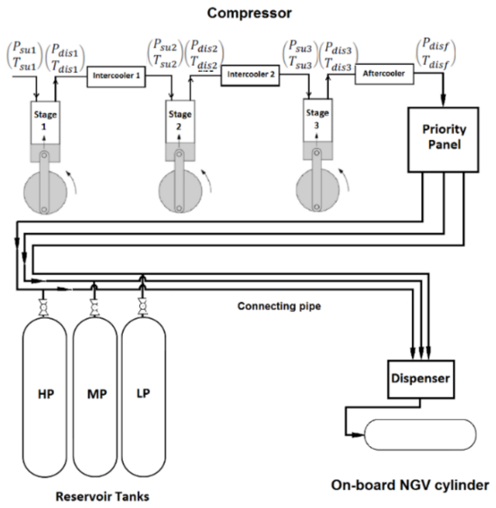
یکی از اهداف این تحقیق، شبیه‌سازی عملکرد یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده در طی چندین فرایند سوخت‌گیری متوالی است. بدین‌منظور ۳شرط مختلف مدل‌سازی شامل فقط مخازن جایگاه خالی شوند، فقط مخازن جایگاه با کمپرسور پر شوند و نهایتا مخازن جایگاه هم‌زمان پر و خالی شوند، در نظر گرفته شده است. هر کدام از این شرایط ممکن است برای هر یک از ۳مخزن فشار بالا، متوسط و پایین رخ دهد. همچنین در این تحقیق برای نخستین‌بار پنل‌های اولویت‌بندی مدل‌سازی و بهترین الگوریتم پنل اولویت‌بندی جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده با هدف به‌حداقل‌رساندن مصرف انرژی تعیین شده است. فرایند پرشدن سریع نیز با درنظرگرفتن مخزن خودرو، مخازن ذخیرهٔ جایگاه و لوله‌های ارتباطی و برمبنای مدل گاز واقعی، مطابق با تحقیق فرزانه‌گرد و همکاران [12] مدل‌سازی شده است.

## مدل‌سازی

یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی از کمپرسور (معمولا سه‌مرحله‌ای)، پنل اولویت‌بندی، مخازن ذخیرهٔ آبشاری، لوله‌های ارتباطی، توزیع‌کننده و مخزن خودرو تشکیل شده است. فرایند پرشدن سریع با ٤مورد آخر انجام می‌شود. در شکل (۱) نمایی از یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی با سیستم ذخیرهٔ آبشاری نشان داده شده است.

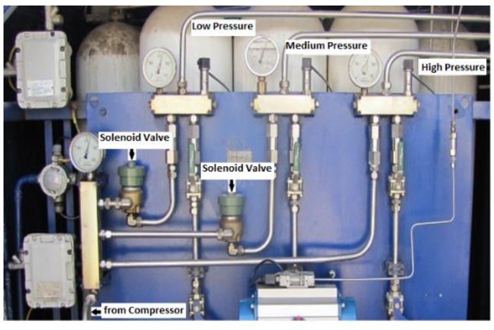
همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم ذخیرهٔ آبشاری معمولا از ۳مجموعه‌مخازن فشار پایین، متوسط و بالا تشکیل شده است. نحوهٔ عملکرد به این ترتیب است که گاز فشردهٔ خروجی از کمپرسور پس از عبور از پنل اولویت‌بندی، وارد مخازن ذخیرهٔ جایگاه می‌شود. وظیفهٔ پنل اولویت‌بندی، کنترل ترتیب پرشدن مخازن جایگاه با کمپرسور است. این سیستم معمولا دارای یک الگوریتم تعریف‌شده است که به‌وسیلهٔ شرکت سازنده برنامه‌ریزی می‌شود. بررسی و دستیابی به الگوریتم اولویت‌بندی بهینه‌شده حائز اهمیت است و به‌عنوان یکی از نوآوری‌های این تحقیق مطرح است. لزوم دستیابی به این الگوریتم‌های بهینه‌شده مهم است، زیرا پیش‌بینی می‌شود با طراحی و انتخاب یک سیستم اولویت‌بندی مناسب برای پرشدن مخازن، بدون تغییر در

طراحی‌های اولیه جایگاه، بتوان هزینه‌های ناشی از مصرف انرژی را کاست. نمایی از پنل اولویت‌بندی برای یک نمونه از جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده، در شکل (۲) نشان داده شده است.




شکل ۱ نمایی شماتیک از یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی با سیستم ذخیرهٔ آبشاری

یک الگوریتم دیگر در توزیع‌کننده وجود دارد که وظیفه‌اش مدیریت تخلیهٔ مخازن جایگاه و پر شدن مخزن خودروست. براساس الگوریتم یادشده، زمانی که دبی جرمی ورودی به مخزن خودرو به مقدار معینی رسید (معمولاً ۰/۰۲ kg/s) مخزن خودرو از مخزن فشار پایین‌تر به مخزن فشار بالاتر متصل می‌شود تا زمانی که فرایند سوخت‌گیری به پایان برسد.




شکل ۲ یک نما از پنل اولویت‌بندی استفاده‌شده در جایگاه سوخت‌رسانی

برای مدل‌سازی مخازن ذخیرهٔ جایگاه، حجم کنترلی داخل مخزن ذخیره در نظر گرفته شده و فشار و دمای داخل آن به صورت یکنواخت فرض شده است. معادلهٔ بقای جرم برای حجم کنترل یادشده به شکل زیر است:

$$\frac{dm_r}{dt} = -\dot{m}_e \qquad (۱)$$

که در آن $\dot{m}_e$ و $m_r$ به‌ترتیب معرف دبی جرمی خروجی از مخازن جایگاه و جرم گاز درون مخازن ذخیرهٔ جایگاه هستند. شکل کلی قانون اول ترمودینامیک برای حجم کنترل یاد شده به شکل زیر است:

$$\dot{Q}_{cv} + \sum \dot{m}_i (h_i + V_i^2/2 + gz_i) = \sum \dot{m}_e (h_e + V_e^2/2 + gz_e) + d/dt[m(u + V^2/2 + gz)]_{cv} + \dot{W}_{cv} \qquad (۲)$$

از تغییرات انرژی جنبش و پتانسیل صرف‌نظر شده است و همچنین برای حجم کنترل با یک خروجی داریم:

$$\frac{dU_r}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{m}_e(h_r) \qquad (۳)$$

برای ساده‌سازی از انتقال حرارت بین مخازن جایگاه و محیط اطراف صرف‌نظر شده است. باتوجه‌به این‌که زمان سوخت‌گیری حدود ۱ دقیقه است، از اثر انتقال حرارت صرف‌نظر می‌شود، زیرا زمان لازم برای انتقال حرارت هنگام سوخت‌گیری وجود ندارد. البته بعد از پایان فرایند سوخت‌گیری تأثیر انتقال حرارت قابل توجه خواهد بود که در بحث بهینه‌سازی الگوریتم‌های بحث‌شده در این مقاله تأثیرگذار است. پس از ساده‌سازی داریم:

$$m_r \frac{du_r}{dt} + u_r \frac{dm_r}{dt} = -\dot{m}_e h_r \qquad (٤)$$

که در آن $u_r$ و $h_r$ به‌ترتیب انرژی داخلی و آنتالپی گاز موجود در مخازن جایگاه هستند. با داشتن خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی می‌توان این مقادیر را محاسبه کرد که در بخش‌های بعدی مطرح خواهد شد. با حل هم‌زمان دستگاه معادلهٔ دیفرانسیل، متشکل از روابط (۱) تا (٤) و معلوم‌بودن مقدار دبی جرمی در یک گام زمانی، می‌توان مقادیر $m_r$ و $u_r$ در گام زمانی بعدی را تعیین کرد.

برای مدل‌سازی مخزن خودرو نیز می‌توان مشابه مخازن جایگاه عمل کرد. روابط حاصل برای مدل‌سازی مخزن خودرو به شرح زیر هستند:

$$\frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_i \quad (۵)$$

$$m_c\frac{du_c}{dt} + u_c\frac{dm_c}{dt} = \dot{m}_i h_r \quad (٦)$$

که در آن $m_c$ ، $\dot{m}_i$ و $u_c$ به‌ترتیب جرم گاز طبیعی ذخیره شده داخل مخزن خودرو، دبی جرمی ورودی به مخزن خودرو و انرژی داخلی گاز طبیعی موجود در مخزن خودرو هستند. روند حل دستگاه معادلهٔ دیفرانسیل حاصل‌شده مشابه مخازن جایگاه است.

جریان گاز طبیعی بین مخازن جایگاه و مخزن خودرو به‌صورت یک جریان یک‌بعدی در نظر گرفته شده است. فرایند شبه‌پایا فرض‌شده و از روابط پایا در بازه‌های زمانی مختلف استفاده شده است. برای محاسبهٔ دبی جرمی داخل لوله‌های ارتباطی در یک بازهٔ زمانی، معادلات بقای جرم، مومنتم و معادلهٔ حالت به شکل زیر هستند:

$$\frac{d(\rho V)}{dx} = 0 \quad (۷)$$

$$\frac{d(\rho VV)}{dx} + \frac{dP}{dx} + \frac{f}{2D}\rho V^2 = 0 \quad (۸)$$

$$P = Z\rho\frac{R}{M}T \quad (۹)$$

که در آن‌ها T, M, R, D, f, P, V, ρ, Z به‌ترتیب دما، وزن مولکولی، ثابت گاز، قطر لوله، ضریب اصطکاک، فشار، سرعت، چگالی و ضریب تراکم‌پذیری هستند. از طرفی داریم:

$$\rho V = \frac{\dot{m}}{A} \quad (۱۰)$$

با ترکیب معادلات (۸) و (۱۰) داریم:

$$\rho^2 V dV + \rho dP + \frac{f dx \dot{m}^2}{2A^2 D} = 0 \quad (۱۱)$$

از مقدار عبارت انرژی جنبشی (عبارت اول از سمت چپ) در مقایسه با سایر عبارت‌ها صرف‌نظر می‌شود [13] که پس از انتگرال‌گیری داریم:

$$\dot{m} = A\frac{1}{\sqrt{f}}\left[\frac{MD(P_1^2 - P_2^2)}{LRT_{avg}Z_{avg}}\right]^{0.5} \quad (۱۲)$$

که در آن $L$ طول لولهٔ ارتباطی بین مخازن جایگاه و مخزن خودرو است. روابط مربوط به محاسبهٔ $T_{avg}$ ، $Z_{avg}$ و $f$ در مرجع [9] آمده است. برای محاسبهٔ مقدار متوسط $f$ از معادله اسپیدزگلس [9] استفاده شده است که مخصوص سیستم‌های انتقال گاز فشار متوسط است:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[\frac{88.5}{1 + \frac{0.09144}{D} + 1.1811D}\right]^{0.5} \quad (۱۳)$$

بنابراین مقدار دبی جرمی در یک بازهٔ زمانی را می‌توان با استفاده از رابطهٔ (۱۲) محاسبه و از آن در روابط (۱) و (۵) استفاده کرد.

کمپرسور استفاده‌شده در جایگاه‌های سوخت‌رسانی گاز طبیعی از نوع رفت و برگشتی است. دبی جرمی خروجی از کمپرسور از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\dot{m}_{co} = \rho_{std} \times Q_{std} = \left(\frac{Mw_{gas}}{Mw_{air}}\right) \times \rho_{air,std} \times Q_{std} \quad (۱٤)$$

که در آن $Q_{std}$، $\rho_{air,std}$، $Mw_{air}$ ، $Mw_{gas}$ به‌ترتیب، ظرفیت کمپرسور در شرایط استاندارد، چگالی هوا در

شرایط ا ستاندارد، وزن مولکولی هوا و وزن مولکولی گاز طبیعی هستند. کار آدیاباتیک کمپرسور سه‌مرحله‌ای ن شان‌داده شده در شکل (۱) نیز از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود.

$$W_{adi}=\frac{k_1}{k_1-1}(Z_{su1}T_{su1}R)\left[\left(\frac{P_{dis1}}{P_{su1}}\right)^{\frac{k_1-1}{k_1}}-1\right]+\frac{k_2}{k_2-1}(Z_{su2}T_{su2}R)\left[\left(\frac{P_{dis2}}{P_{su2}}\right)^{\frac{k_2-1}{k_2}}-1\right]+\frac{k_3}{k_3-1}(Z_{su3}T_{su3}R)\left[\left(\frac{P_{dis3}}{P_{su3}}\right)^{\frac{k_3-1}{k_3}}-1\right] \quad (۱۵)$$

نهایتاً برای محا سبه کار واقعی کمپر سور از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود:

$$W_a=\frac{W_{adi}}{\eta_c\times\eta_m} \quad (۱۶)$$

که در آن $\eta_c$ و $\eta_m$ به‌ترتیب راندمان تراکم و راندمان مکانیکی هستند که معمولاً تو سط شرکت‌های سازنده کمپر سور ارائه می شوند. م شخ صات کمپر سور مدل‌سازی‌شده در این تحقیق در مرجع [9] آمده است.

برای تعیین خواص ترمودینامیکی گاز طبیعی در مراحل مختلف مدل‌سازی از استاندارد AGA8 استفاده شده است. با استفاده از این روش می‌توان ضریب تراکم‌پذیری و چگالی گاز طبیعی را محاسبه کرد. معادلهٔ مربوط به ضریب تراکم‌پذیری Z در این روش به‌صورت زیر ارائه شده است [14]:

$$Z=1+B\rho_m-\rho_r\sum_{n=13}^{18}C_n^*+\sum_{n=13}^{58}C_n^*D_n^* \quad (۱۷)$$

در معادلهٔ فوق، Z ضریب تراکم‌پذیری، B ضریب دوم ویریال، $\rho_r$ دانسیتهٔ کاهیده، $C_n^*$ و $D_n^*$ ضرایبی تابع دما و ترکیبات گاز طبیعی هستند. مقادیر پارامترهای ذکرشده برای شماره ۱ تا ۵۸ در مرجع [14] قابل مشاهده است. جزئیات بیشتر مربوط به استاندارد یادشده و همچنین روش انجام مدل‌سازی و اعتبارسنجی آن در تحقیق فرزانه‌گرد و همکاران [12] ارائه شده است.

لازم به ذکر است که ترکیب گاز طبیعی استفاده‌شده در این تحقیق، گاز طبیعی منطقهٔ خانگیران ا ست که درصد ترکیبات آن در مرجع [5] آمده است.

## بهینه‌سازی

وظیفهٔ پنل اولویت‌بندی کنترل ترتیب پرشدن مجموعه‌مخازن جایگاه با کمپرسور است. این کنترل را الگوریتمی که در پنل اولویت‌بندی اجرا می‌شود، انجام می‌دهد. بنابراین تعیین بهترین الگوریتم پرشدن مخازن جایگاه (پنل اولویت‌بندی) به‌عنوان یکی از اهداف و نوآوری‌های این تحقیق در نظر گرفته شده که روابط مورد استفاده آن در بخش جاری تشریح شده است. برای این مسئله بهینه‌سازی ۳تابع هدف در نظر گرفته شده است. ماکزیمم‌کردن مقدار جرم ذخیره‌شده در مخزن خودرو به‌عنوان یکی از توابع هدف در نظر گرفته شده است. مینیمم‌کردن زمان سوخت‌گیری نیز به‌عنوان دومین تابع هدف مطرح است. باتوجه‌به این‌که به‌کارگیری الگوریتم‌های مختلف در تابلو اولویت‌بندی علاوه بر تفاوت در مقدار جرم ذخیره‌شده در مخزن خودرو و زمان سوخت‌گیری می‌تواند سبب تفاوت در مقدار کار مصرفی کمپرسور نیز بشود، پارامتری با عنوان میانگین مصرف انرژی مخصوص (Average Specific Energy Consumption (ASEC)) تعریف شده است که بتوان انرژی مصرفی کمپرسور را مقایسه کرد. لازم به ذکر است که این پارامتر نخستین‌بار در این تحقیق ارائه شده است و تاکنون در تحقیق دیگری مشاهده نشده است. برطبق تعریف، میانگین مصرف انرژی مخصوص برابر

است با نسبت مقدار انرژی مصرفی برای پرشدن یک خودرو به جرم کل گاز ذخیره‌شده در مخزن همان خودرو.

پس برای انتخاب بهترین الگوریتم پرشدن مخازن جایگاه، ۳تابع هدف زیر در نظر گرفته شده است:

$$Min \quad \begin{Bmatrix} ASEC\ (P_{HPR,i}, P_{MPR,i}, P_{LPR,i}, P_{c,i}, V_c, PPA\ ) \\ FT \quad (P_{HPR,i}, P_{MPR,i}, P_{LPR,i}, P_{c,i}, V_c, PPA\ ) \\ -FM\ (P_{HPR,i}, P_{MPR,i}, P_{LPR,i}, P_{c,i}, V_c, PPA\ ) \end{Bmatrix}$$

که در آن متغیرهای توابع هدف شامل $P_{HPR,i}$، $P_{MPR,i}$، $P_{LPR,i}$، $P_{c,i}$، $V_c$ به‌ترتیب فشار اولیهٔ مخازن فشار بالای جایگاه، فشار اولیهٔ مخازن فشار متوسط جایگاه، فشار اولیهٔ مخازن فشار پایین جایگاه، فشار اولیهٔ مخزن خودرو و حجم مخزن خودرو هستند. همچنین PPA همان الگوریتم تابلو اولویت‌بندی، FT زمان سوخت‌گیری و FM مقدار جرم سوخت‌گیری‌شده است. باتوجه‌به این‌که مسئله بهینه‌سازی یک مسئله با چند تابع هدف است، می‌توان ۲تابع هدف را به ۲قید تبدیل و این مسئله را با ۳تابع هدف به مسئلهٔ بهینه‌سازی با یک تابع هدف (کمینه‌کردن) و ۲قید بدل کرد:

$$\{\ ASEC\ (P_{HPR,i}, P_{MPR,i}, P_{LPR,i}, P_{c,i}, V_c, PPA\ )$$
با قید $(\dot{m})_j \geq 0.02$ برای $j=1, \dots$ (۱۹)
$(P_{HPR})_j \geq 200\ \text{bar}$ برای $j=1, \dots$

وا ضح ا ست که برخی از متغیرهای رابطهٔ (۱۸) را می‌توان معلوم و ثابت در نظر گرفت، زیرا م شخ صات جایگاه و خودرو ه ستند. با معلوم‌بودن متغیرها، م سئلهٔ بهینه‌سازی به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

کمینه کردن $\{\ ASEC\ (PPA\ )\}$
با قید $(\dot{m})_j \geq 0.02$ برای $j=1,$ (۲۰)
$(P_{HPR})_j \geq 200\ \text{bar}$ برای $j=1, \dots$

فرایند حل (شامل شبیه‌سازی فرایند پرشدن سریع، کمپرسور و پنل اولویت‌بندی) برای الگوریتم‌های مختلف تابلو اولویت‌بندی، اجرا شده و نهایتا الگوریتمی که کمترین میانگین مصرف انرژی مخصوص را داراست، به‌عنوان الگوریتم بهینه انتخاب شده است. به این ترتیب بهترین الگوریتم برای پرشدن مخازن ذخیرهٔ جایگاه تعیین شده است. مشخصات مربوط به جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده و مخزن خودرو برای بهینه‌سازی در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که این مشخصات برمبنای یک جایگاه واقعی (جایگاه شمارهٔ ۱۰۴۳ واقع در مشهد) است. همچنین مشخصات کمپرسور جایگاه در مرجع [9] تشریح شده است.

جدول ۱ مشخصات مربوط به جایگاه سوخت‌رسانی و مخزن خودرو گاز طبیعی برای بهینه‌سازی

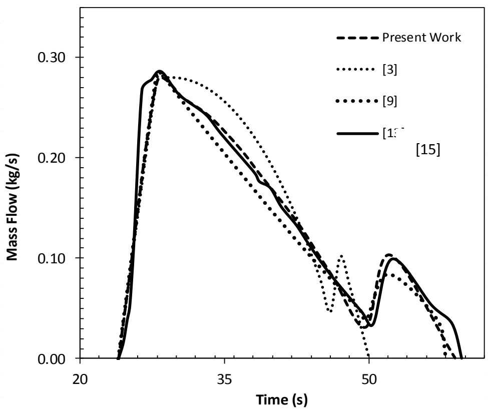
| | |
|---|---|
| حجم مخزن خودرو | ۱۰۱ لیتر |
| حجم مخازن ذخیرهٔ فشار پایین | ۲۸۸۰ لیتر |
| حجم مخازن ذخیرهٔ فشار متوسط | ۱۹۲۰ لیتر |
| حجم مخازن ذخیرهٔ فشار بالا | ۹۶۰ لیتر |
| تعداد خط‌های فشار | ۳ |
| طول لوله‌های ارتباطی | ۵۰ متر |
| قطر داخلی لوله‌های ارتباطی | ۰/۰۰۹ متر |
| فشار اولیهٔ مخزن خودرو | ۱ بار |
| فشار اولیهٔ مخزن ذخیرهٔ جایگاه | ۲۳۵ بار |
| دمای اولیهٔ مخازن جایگاه و خودرو | ۳۰۰ کلوین |
| تعداد توزیع‌کننده | ۸ عدد |
| ظرفیت کمپرسور در شرایط نرمال | ۱۹۰۰ متر مکعب بر ساعت |

## نتایج

***اعتبارسنجی مدل‌سازی فرایند پرشدن سریع.*** پس از انجام مدل‌سازی و به‌منظور اعتبارسنجی نتایج آن،

مقایسه‌ای با نتایج تجربی تحقیق [15] صورت گرفته است. شرایط و مشخصات اندازه‌گیری تجربی در مرجع [15] آورده شده است. همچنین برای نشان‌دادن بهبود نتایج این تحقیق نسبت به تحقیقات پیشین [3,9]، مقایسهٔ نتایج صورت گرفته است. نتایج مربوط به تغییرات دبی جرمی جریان در طی زمان پرشدن در شکل (۳) نشان داده شده است. فرایند پرشدن سریع بعد از ۲٤ثانیه آغاز و در زمان حدود ٦۰ثانیه متوقف می‌شود. بیشینه دبی جرمی مقدار kg/s۰/۲۹ و کمینه آن kg/s۰/۰ است. زمانی که دبی جرمی برای اولین‌بار به مقدار kg/s۰/۰٤ رسید، باتوجه‌به الگوریتمی که در توزیع‌کننده وجود دارد، مخزن خودرو به مخزن با فشار بالاتر متصل شده است. در حقیقت بین ثانیهٔ ۲٤ تا ۵۰ مخزن شماره۱ جایگاه مخزن خودرو را هدف قرار داده و سپس مخزن شماره۲ جایگاه مخزن خودرو را پر می‌کند. مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیری دبی جرمی نشان می‌دهد که نتایج این تحقیق دقت بهتری نسبت به نتایج تحقیقات قبل [3,9] دارد. علت این امر را می‌توان در مدل‌سازی لوله‌های ارتباطی، درنظرگرفتن تغییرات شرایط مخازن جایگاه و استفاده از مدل گاز واقعی دانست. نتایج مرجع [3] انحراف زیادی مخصوصا در ثانیهٔ ۵۰ دارد که دلیل آن مدل‌سازی بسیار ساده در تحقیق [3] است که حتی نمی‌توان عمل سوئیچ‌شدن به مخزن فشار بالا را در نتایج آن مشاهده کرد. مشکل این مدل‌سازی ساده، استفاده از مدل گاز ایدئال است که با رفتار گاز واقعی بسیار انحراف دارد.

***نتایج مربوط به شبیه‌سازی یک جایگاه با شرایط واقعی.*** یکی از اهداف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی عملکرد یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده در چندین فرایند سوخت‌گیری متوالی است. بدین‌منظور ۳شرایط مختلف مدل‌سازی شامل فقط مخازن جایگاه خالی شوند، فقط مخازن جایگاه توسط کمپرسور پر شوند و نهایتا مخازن جایگاه هم‌زمان پر و خالی شوند، در نظر گرفته شده است. هر کدام از این شرایط ممکن است




شکل ۳ مقایسهٔ نتایج مدل‌سازی و اندازه‌گیری‌شده برای دبی جرمی

برای هر یک از ۳مخزن فشار بالا، متوسط و پایین رخ دهند. بنابراین همین امر سبب بروز پیچیدگی‌های زیادی در انجام شبیه‌سازی می‌شود. نتایج مربوط به شبیه‌سازی عملکرد یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده در طی چندین فرایند سوخت‌گیری متوالی در شکل (٤) ارائه شده است. در شبیه‌سازی صورت‌گرفته گاز طبیعی با ترکیبات منطقهٔ خانگیران در نظر گرفته شده است. مشخصات جایگاه در جدول (۱) ارائه شده است. فرض شده است که ٤توزیع‌کننده هم‌زمان درحال سوخت‌گیری و ٤توزیع‌کننده دیگر درحال تعویض خودرو، مقدمات شروع سوخت‌گیری یا درحال پرداخت صورت‌حساب به اپراتور هستند. به بیان ساده‌تر، ٤توزیع‌کننده درحال انتقال گاز و ٤توزیع‌کنندهٔ دیگر هیچ گازی را منتقل نمی‌کنند. الگوریتم خالی‌شدن مخازن براساس الگوریتم عنوان‌شده در زیر است:

- برداشتن نازل از روی توزیع‌کننده؛
- متصل‌کردن نازل به مخزن خودرو؛
- بازشدن شیر مخزن فشار پایین و آغاز فرایند سوخت‌گیری؛
- بسته‌شدن شیر فشار پایین و بازشدن شیر فشار متوسط زمانی که دبی جرمی به مقدار ۰/۰۲ می‌رسد؛

- ➢ بسته‌شدن شیر فشار متوسط و بازشدن شیر فشار بالا زمانی که دبی جرمی به مقدار ۰/۰۲ می‌رسد؛
- ➢ بسته‌شدن شیر فشار بالا زمانی که دبی جرمی به مقدار ۰/۰۲ می‌رسد و پایان فرایند سوخت‌گیری.

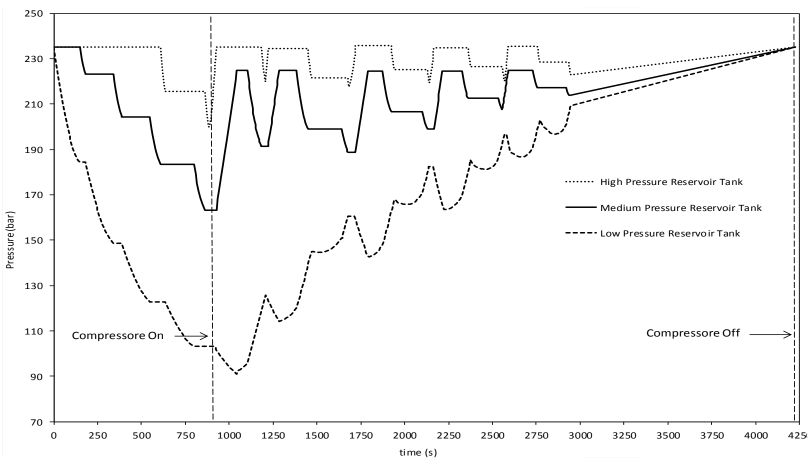
این الگوریتم همان الگوریتمی است که امروزه در همهٔ جایگاه‌ها استفاده می‌شود.

الگوریتم پرشدن مخازن ذخیرهٔ جایگاه در پنل اولویت‌بندی به این ترتیب است:

کمپرسور تا زمانی که فشار مخزن فشار بالا بیشتر از ۲۰۰بار است، خاموش می‌ماند. به‌محض این‌که فشار مخزن فشار بالا به زیر ۲۰۰بار رسید، کمپرسور روشن و فشار مخزن فشار بالا را به ۲۳۵بار می‌رساند. سپس کمپرسور، مخزن فشار متوسط را در هر فشاری که باشد به فشار۲۳۵بار می‌رساند. بعد از آن به مخزن فشار پایین متصل و تا زمانی که مخزن فشار بالا به ۲۲۰بار برسد، آن مخزن را پر می‌کند. با رسیدن فشار مخزن فشار بالا به ۲۲۰بار، کمپرسور هر مخزنی را که درحال پرکردن است، رها می‌کند و به‌سراغ مخزن فشار بالا می‌رود. این روند تا زمانی که فشار مخزن فشار پایین به ۲۱۰بار برسد ادامه و بعد از آن کمپرسور هر ۳مخزن را تا رسیدن فشار هر سه به ۲۳۵بار پر می‌کند. زمانی که فشار هر ۳مخزن به ۲۳۵بار رسید، کمپرسور خاموش می‌شود.

برطبق نتایج شبیه‌سازی، فشار مخزن فشار بالا در ثانیهٔ ۸۸٤ به زیر ۲۰۰بار می‌رسد، بنابراین کمپرسور در این زمان روشن می‌شود. سپس کمپرسور بر طبق الگوریتم تشریح‌شده (پنل اولویت‌بندی) مخازن را پر می‌کند. در ثانیهٔ ۲۹٤٦ فشار مخزن فشار پایین تا ۲۱۰بار افزایش می‌یابد. در این زمان کمپرسور هر ۳مخزن را تا فشار ۲۳۵بار پر می‌کند. در ثانیهٔ ٤۲۲٦ فشار هر ۳مخزن به ۲۳۵بار می‌رسد و کمپرسور خاموش می‌شود. باتوجه‌به این‌که برای مدل‌سازی این حالت از یک روش ترمودینامیکی جایگزین استفاده شده است، نتایج مربوط به تغییرات فشار با زمان در شکل (٤)، از ثانیهٔ ۲۹٤٦ تا پایان فرایند، فیزیکی نیستند، اما باتوجه‌به روند مدل‌سازی، نتایج از لحاظ زمان و همچنین مقدار انرژی مصرفی کمپرسور مناسب هستند. در شکل (٤) زمان‌هایی وجود دارد که مقدار فشار مخازن ثابت می‌ماند و مربوط به زمانی است که نه از مخزن برداشت می‌شود و نه کمپرسور آن را پر می‌کند.

مشابه نتایج ارائه‌شده در این بخش تاکنون در تحقیقی مشاهده نشده است. از آن‌جایی که در بهینه‌سازی پنل اولویت‌بندی، نتایج این شبیه‌سازی نقشی مهم ایفا می‌کند، اهمیت استخراج این نتایج بیشتر شده است.




شکل ٤ تغییرات فشار مخازن ذخیره برای چندین سوخت‌گیری متوالی

***نتایج مربوط به تعیین بهترین الگوریتم پنل اولویت‌بندی.*** همان‌طور که در اشاره شد، وظیفهٔ پنل اولویت‌بندی کنترل ترتیب پرشدن مجموعه‌مخازن جایگاه با کمپرسور است. تعیین بهترین الگوریتم پنل اولویت‌بندی به‌عنوان مهم‌ترین هدف و نوآوری این تحقیق در نظر گرفته شده است که روابط مربوط به آن در بخش بهینه‌سازی تشریح و در بخش حاضر نتایج مربوط به آن ارائه شده است. در بخش اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی فرایند پرشدن سریع، دقت و ارتقای مدل ارائه‌شده در این تحقیق نسبت به مدل‌های پیشین بررسی شد. با استفاده از این مدل و طراحی یک مسئلهٔ بهینه‌سازی، بهترین الگوریتم پنل اولویت‌بندی برای جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی با مخازن آبشاری تعیین شده است. روند حصول نتایج به این ترتیب است که برای الگوریتم‌های مختلف پنل اولویت‌بندی، شبیه‌سازی جایگاه صورت گرفته است و نهایتا الگوریتمی که کمترین میانگین صرف انرژی مخصوص را دارد، به‌عنوان الگوریتم بهینه انتخاب شده است. باتوجه‌به وجود محدودیت‌های ایمنی و سایر موارد [16]، ٦ الگوریتم متفاوت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که شرایط گاز طبیعی، جایگاه، مخازن و شرایط شروع و پایان عملکرد جایگاه در یک سیکل روشن و خاموش‌شدن کمپرسور کاملا یکسان در نظر گرفته شده است.

***الگوریتم PPH220.*** فشار هر ۳مخزن ذخیره ۲۳۵بار است. فرایند سوخت‌گیری آغاز می‌شود و تا ثانیهٔ ١٧٦ کمپرسور خاموش است. در ثانیهٔ ١٧٦ فشار مخزن فشار بالا به زیر ۲۰۰بار می‌رسد و فرمان روشن‌شدن کمپرسور صادر می‌شود. به‌محض روشن‌شدن کمپرسور، مخزن فشار بالا تا رسیدن به مقدار ۲۳۵بار پر می‌شود. سپس طبق الگوریتم مطرح‌شده، تابلو اولویت‌بندی مخزن فشار متوسط را انتخاب و آن را تا رسیدن به فشار ۲۲۰بار پر می‌کند. سپس نوبت به مخزن فشار پایین می‌رسد و کمپرسور شروع به پرکردن این مخزن نیز می‌کند. در حین پرشدن مخازن فشار متوسط و فشار پایین با کمپرسور، به‌دلیل برداشت از مخزن فشار بالا، فشار این مخزن افت می‌کند. پرکردن مخزن فشار پایین تا زمانی که فشار مخزن فشار بالا به کمتر از ۲۲۰بار برسد، ادامه دارد. به‌محض این‌که فشار مخزن فشار بالا به کمتر از ۲۲۰بار رسید، کمپرسور مخزن فشار پایین را رها و مجددا مخزن فشار بالا را تا رسیدن فشار آن به ۲۳۵بار پر می‌کند. این فرایند ادامه می‌یابد تا زمانی که در ثانیهٔ ۵۲۳فشار مخزن کم‌فشار به ۲۱۰بار می‌رسد. از این زمان به بعد کمپرسور هر ۳مخزن را تا فشار ۲۳۵بار پر می‌کند. در ثانیهٔ ۱۳۲۵فشار هر ۳مخزن به ۲۳۵بار می‌رسد و کمپرسور خاموش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که از زمان شروع سوخت‌گیری تا زمانی که مجددا فشار هر ۳مخزن به ۲۳۵بار رسیده است، مقدار ٤٠٨/٩٤ کیلوگرم گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها به مخازن خودرو ارسال شده است. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در زمان عملکرد برابر با ۹۲/۰۹ kWh محاسبه شده است که باتوجه‌به این نتایج می‌توان مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص را تعیین کرد. براساس توضیحات مطرح‌شده در بخش بهینه‌سازی، این مقدار به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. پس مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای الگوریتم PPH220 برابر ۰/۰۲۲۵۱ kWh/kg تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که در همهٔ مراحل شبیه‌سازی هموار ۲قید $(\dot{m})_j \geq 0.02$ و $(P_{HPR})_j \geq 200$ bar در نظر گرفته شده‌اند.

***الگوریتم PPH225.*** در این الگوریتم زمانی که فشار مخزن فشار بالا به مقدار ۲۲۵بار برسد، کمپرسور به‌سراغ مخزن فشار متوسط می‌رود. همچنین زمانی که فشار مخزن فشار متوسط به ۲۱۰بار برسد، کمپرسور این مخزن را رها می‌کند و به‌سراغ مخزن فشار پایین می‌رود. نتایج نشان می‌دهد که از زمان شروع سوخت‌گیری تا زمانی که مجددا فشار هر ۳مخزن به ۲۳۵بار می‌رسد، مقدار ٤٢١/٨ kg گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها وارد مخازن خودرو می‌شود. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در زمان عملکرد برابر با ٩٦/٣٤ kWh محاسبه شده که

باتوجه‌به این نتایج، مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای الگوریتم PPH225 برابر ۰/۲۲۸٤ kWh/kg به‌دست می‌آید.

***الگوریتم PPHML:*** شاید ساده‌ترین الگوریتمی که از ابتدا برای پرشدن مخازن ذخیرهٔ جایگاه به ذهن برسد، الگوریتم PPHML باشد. الگوریتمی که در آن از ابتدا کمپرسور هر ۳مخزن را هم‌زمان پر کند. به‌عبارت دیگر مشابه آن‌چه که در پایان الگوریتم‌های قبلی و بعدی رخ می‌دهد، از همان ابتدا هر ۳مخزن پر می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که از زمان شروع سوخت‌گیری، مقدار ٤٤٠/۸۲ kg گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها وارد مخازن خودرو می‌شود. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در زمان عملکرد برابر ۱۰۱/۸۷ kWh محاسبه شده که باتوجه‌به این نتایج، مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای الگوریتم PPHML برابر ۰/۲۳۱۰ kWh/kg تعیین شده است.

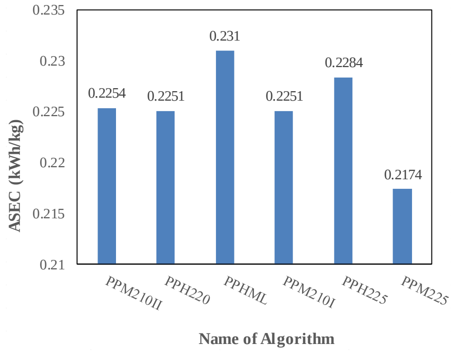
***الگوریتم PPM210I:*** در این الگوریتم اجازه داده می‌شود فشار مخزن فشار بالا تا ۲۱۵بار پایین بیاید و سپس کمپرسور آن را پر کند. همچنین بیشینه فشار مخزن فشار متوسط مقدار ۲۱۰بار است. نتایج نشان می‌دهد که در زمان سوخت‌گیری، مقدار ٤۳۰/۵۰ kg گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها وارد مخازن خودرو شده است. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در زمان عملکرد برابر با ۹٦/۹۰۹ kWh محاسبه شده است. همچنین مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای الگوریتم PPM210I برابر ۰/۲۲۵۱ kWh/kg تعیین شده است.

***الگوریتم PPM225:*** بر طبق این الگوریتم کمترین فشار مجاز برای مخزن فشار بالا برابر ۲۲۰بار تعیین شده است. همچنین بیشینه فشار مخزن فشار متوسط برابر ۲۲۵بار است. نتایج نشان می‌دهد که در زمان سوخت‌گیری، مقدار ۳۹٦/۷۷ kg گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها وارد مخازن خودرو شده است. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در این زمان برابر با ۸٦/۲۹ kWh محاسبه شده است. همچنین مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای این الگوریتم برابر ۰/۲۱۷٤ kWh/kg تعیین شده است.

***الگوریتم PPM210II:*** در این الگوریتم اجازه داده می‌شود فشار مخزن فشار بالا تا ۲۲۰بار کاهش یابد و سپس کمپرسور آن را پر کند. همچنین بیشینه فشار مخزن فشار متوسط مشابه الگوریتم PPM210I مقدار ۲۱۰بار است. نتایج نشان می‌دهد که در زمان سوخت‌گیری، مقدار ٤۲۳/۸۰ kg گاز طبیعی از طریق توزیع‌کننده‌ها وارد مخازن خودرو شده است. مقدار انرژی مصرفی کمپرسور در زمان عملکرد برابر با ۹۵/۵۳ kWh به‌دست آمده است. همچنین مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص برای الگوریتم PPM210II برابر ۰/۲۲۵٤ kWh/kg است.

جمع‌بندی نتایج مربوط به تعیین الگوریتم بهینه برای پرشدن مخازن ذخیرهٔ جایگاه در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طور که در جمع‌بندی نتایج مشاهده می‌شود، کمترین مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص مربوط به الگوریتم PPM225 و برابر ۰/۲۱۷٤ kWh/kg است. برای مشاهدهٔ اثر استفاده از الگوریتم بهینه در جایگاه‌های کشور، روند زیر پیگیری شده است:

مقدار مصرف گاز طبیعی فشرده کشور در جایگاه‌ها حدود ۱۵،۰۰۰،۰۰۰ کیلوگرم در روز برای سال ۱۳۹۵ است [17]. تفاوت مقدار انرژی مصرفی بین حالت بهینه با حالت میانگین الگوریتم‌های فوق مقدار ۰/۰۰۸ kWh/kg است.




شکل ۵ نتایج مربوط به تعیین الگوریتم بهینه برای پنل اولویت‌بندی

بنابراین در صورت استفاده از الگوریتم بهینه مقدار ۱۲۰،۰۰۰ kWh در یک روز، معادل ۴۳،۸۰۰،۰۰۰ kWh در یک سال صرفه‌جویی می‌شود. اگر به‌طور متوسط قیمت هر کیلووات‌ساعت انرژی را ۱۵۰۰ریال در نظر بگیریم، سالانه ۶۵،۷۰۰ میلیون ریال صرفه‌جویی مالی می‌شود (۳/۵درصد کل هزینه‌ها در یک سال). درحالی که هزینهٔ اولیه‌ای موردنیاز برای اعمال این الگوریتم بهینه در جایگاه‌ها بسیار ناچیز است.

## نتیجه‌گیری

استفاده از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت خودرو دارای مزیت‌هایی از جمله ارزان‌بودن، میزان آلایندگی کمتر و دسترس‌پذیری بیشتر نسبت به سوخت بنزین است. در این تحقیق برای نخستین‌بار پنل‌های اولویت‌بندی مدل‌سازی و بهترین الگوریتم پنل اولویت‌بندی جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده با هدف به‌حداقل‌رساندن مصرف انرژی تعیین شده است. پس از انجام مدل‌سازی و به‌منظور اعتبارسنجی نتایج آن، مقایسه‌ای با نتایج تجربی صورت گرفته است. همچنین برای نشان‌دادن بهبود نتایج این تحقیق نسبت به تحقیقات پیشین، مقایسهٔ نتایج صورت گرفته است. مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیری دبی جرمی نشان می‌دهد که نتایج این تحقیق دقت بهتری نسبت به نتایج تحقیقات قبل دارد. علت این امر را می‌توان در مدل‌سازی لوله‌های ارتباطی، درنظرگرفتن تغییرات شرایط مخازن جایگاه و استفاده از مدل گاز واقعی دانست. یکی از اهداف اصلی این تحقیق، شبیه‌سازی عملکرد یک جایگاه سوخت‌رسانی گاز طبیعی فشرده در چندین فرایند سوخت‌گیری متوالی است. از آن‌جایی که در بهینه‌سازی پنل اولویت‌بندی، نتایج شبیه‌سازی نقشی مهم ایفا می‌کنند، اهمیت استخراج نتایج شبیه‌سازی بیشتر شده است. وظیفه پنل اولویت‌بندی کنترل ترتیب پرشدن مجموعه‌مخازن جایگاه با کمپرسور است. روند تعیین الگوریتم‌های بهینه برای پنل اولویت‌بندی به این ترتیب است که برای الگوریتم‌های مختلف، شبیه‌سازی جایگاه صورت گرفته است و نهایتا الگوریتمی که کمترین میانگین صرف انرژی مخصوص را دارد، به‌عنوان الگوریتم بهینه انتخاب شده است. باتوجه‌به وجود محدودیت‌های ایمنی و سایر موارد، ۶الگوریتم متفاوت در نظر گرفته شده است. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار میانگین مصرف انرژی مخصوص مربوط به الگوریتم PPM225 و برابر ۰/۲۱۷۴ kWh/kg است. برای مشاهدهٔ اثر استفاده از الگوریتم بهینه در جایگاه‌های کشور، محاسباتی صورت گرفته است.

در این تحقیق، محاسبات نشان می‌دهد که در صورت استفاده از الگوریتم بهینهٔ مشخص‌شده، مقدار ۱۲۰،۰۰۰ kWh در یک روز انرژی صرفه‌جویی می‌شود. این مقدار معادل سالانه ۶۵،۷۰۰ میلیون ریال صرفه‌جویی مالی است (۳/۵درصد کل هزینه‌ها در یک سال). درحالی که هزینهٔ اولیهٔ مورد نیاز برای اعمال این الگوریتم بهینه در جایگاه‌ها بسیار ناچیز است.

## واژه نامه

| | |
|---|---|
| میانگین مصرف انرژی مخصوص | Average Specific Energy Consumption |
| پر شدن سریع | Fast filling |
| گاز طبیعی فشرده | CNG |
| پنل اولویت بندی | Priority panel |
| معادلات حاکم | Governing equations |

| | |
|---|---|
| توزیع‌کننده | Dispenser |
| زمان سوخت‌گیری | Filling time |
| جرم سوخت‌گیری | Filling mass |

## فهرست علائم

| | |
|---|---|
| A | مساحت ($m^2$) |
| B | ضریب دوم ویریال |
| $C_n^*$ | ضریب وابسته به دما و درصد ترکیبات گاز |
| $c_p$ | ظرفیت حرارتی در فشار ثابت (kJ/kg K) |
| $c_v$ | ظرفیت حرارتی در حجم ثابت (kJ/kg K) |
| D | قطر (m) |
| $D_n^*$ | ضریب وابسته به دما و درصد ترکیبات گاز |
| F | ضریب اصطکاک |
| $F_i$ | پارامتر مشخصهٔ عضو i ام |
| G | شتاب جاذبه ($m/s^2$) |
| H | آنتالپی (kJ/kg) |
| K | ضریب انبساط آیزنتروپیک |
| kWh | کیلووات‌ساعت |
| L | لیتر |
| L | طول (m) |
| $\dot{m}$ | دبی جرمی (kg/s) |
| M | وزن مولکولی (kg/kmol) |
| P | فشار (bar) |
| $\dot{Q}$ | نرخ انتقال حرارت (kW) |
| R | ثابت گاز (J/mol K) |
| T | دما (K) |
| T | زمان (s) |
| U | انرژی داخلی (kJ/kg) |
| V | حجم ($m^3$) |
| V | سرعت (m/s) |
| W | کار واقعی (kJ/kg) |
| $\dot{W}$ | نرخ کار واقعی (kW) |
| z | ارتفاع (m) |
| Z | ضریب تراکم |

### علایم یونانی

| | |
|---|---|
| ρ | چگالی (kg/m3) |

### زیرنویس‌ها

| | |
|---|---|
| a | واقعی |
| avg | میانگین |
| c | مخزن ذخیرهٔ خودرو |
| co | کمپرسور |
| cv | حجم کنترل |
| dis | تخلیه |
| HPR | مخزن فشار بالا |
| LPR | مخزن فشار پایین |
| MPR | مخزن فشار متوسط |
| r | مخازن ذخیرهٔ جایگاه |
| su | مکش |
| std | استاندارد |

## مراجع


1. Kountz, K., " Modeling The Fast Fill Process in Natural Gas Vehicle Storage Cylinders", American Chemical Society Paper at 207th National ACS Meeting, March, (1994).
2. Farzaneh-Gord, M., Hashemi, S., Farzaneh-Kord, S., "Thermodynamics Analysis of Cascade Reserviors Filling Process of Natural Gas Vehicle Cylinders", *World Applied Sciences Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 143-149, (2008).
3. Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Rahbari, H. R., "Studying effects of storage types on performance of CNG filling stations", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 3, No. 1,

pp. 334-340, (2011).

4. Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaz, M., Rahbari, H. R., "Optimising Compressed Natural Gas filling stations reservoir pressure based on thermodynamic analysis", *International Journal of Exergy*, Vol. 10, No. 3, pp. 299-320, (2012).
5. Mahdizadeh Rokhi, M. D. D. M., Farzaneh Gord, M., Abbasi, M., "An investigation in the effect of natural gas composition on the filling processes of an automobile CNG cylinder in order to define the optimized conditions of the fuel transmission station", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 103-110, (2013).
6. Khamforoush, M., Moosavi, R., Hatami, T., "Compressed natural gas behavior in a natural gas vehicle fuel tank during fast filling process: Mathematical modeling, thermodynamic analysis, and optimization", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 20, No. 0, pp. 121-131, (2014).
7. Deymi-Dashtebayaz, M., Farzaneh Gord, M., Rahbari, H. R., "Studying transmission of fuel storage bank to NGV cylinder in CNG fast filling station", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 34, pp. 429-435, (2012).
8. Khadem, J., Saadat-Targhi, M., Farzaneh-Gord, M., "Mathematical modeling of fast filling process at CNG refueling stations considering connecting pipes", *Journal of Natural Gas Science and Engineering,* Vol. 26, pp. 176-184, (2015).
9. Saadat-Targhi, M., Khadem, J., Farzaneh-Gord, M., "Thermodynamic analysis of a CNG refueling station considering the reciprocating compressor", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 29, pp. 453-461, (2016).
10. Kagiri, C., Xiaohua Xia, L., "Optimization of a compressed natural gas station operation to minimize energy cost", *Energy Procedia*, Vol. 142, pp. 2003-2008, (2017).
11. Kagiri, C., M.Wan jiru, E., Zhang, L., Xia, X., "Optimized response to electricity time-of-use tariff of a compressed natural gas fuelling station ", *Applied Energy*, Vol. 222, pp. 244-256, (2018).
12. Farzaneh-Gord, M., Saadat-Targhi, M., Khadem, J., "Selecting optimal volume ratio of reservoir tanks in CNG refueling station with multi-line storage system", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 40, pp. 25453-25473, (2017).
13. Menon, E. S., "Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual" *Elsevier Science*, pp.710-745, (2014).
14. Starling, K. E., "A. G. A. O. S. T. M. Committee, Compressibility and Super compressibility for Natural Gas and Other Hydrocarbon Gases" Operating Section, American Gas Association, (1986).
15. George, D., "CNG Sampling, in Natural gas" sampling technology conference, New Orleans, Louisiana, pp. 72-80, (2014).
16. Imran Khan, M., Yasmin, T., Shakoor, A., "Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, No. 0, pp. 785-797, (2015).
17. www.ilna.ir/367451, 5/2/(2016)

# Determining the Optimal Algorithm of Priority Panel in CNG Refueling Station to Minimize Energy Cost

Morteza Saadat-Targhi[1] Javad Khadem[2]
Mahmood Farzaneh-Gord[3]

## 1. Introduction

Natural gas as a car fuel has advantages such as being cheaper, less polluting, and more accessible than gasoline fuel. The use of various gases (hydrogen and natural gas) as alternative fuels for cars has been considered by many researchers for years. It is necessary to use these clean and cheap fuels, design and build refueling stations. The fast filling process is the main process that occurs in the CNG refueling station. The basis of the fast-filling process is that the CNG is first stored in the storage tanks up to a pressure of 235 bar. It is then transferred to the vehicle tank by communication pipes and other station equipment (such as the priority panel and dispenser). In the analysis of the performance of a CNG refueling station, two goals are presented: reducing the compressor consumption and reducing the filling time. Performance analysis requires accurate simulations that can be validated with experimental results. A review of previous research shows that there is no research that expresses a complete simulation that is consistent with the actual conditions of the site. Also, no study on the modeling of priority panels in CNG stations has been reported so far. Due to the lack of modeling, the results of optimization related to priority panels have not been reported so far. One of the objectives of this study is to simulate the performance of a CNG refueling station during several consecutive refueling processes. For this purpose, three different modeling conditions are considered, including: Only gas tanks should be emptied, only tanks should be filled by the compressor, and finally the tank tanks should be filled and emptied at the same time. These conditions may occur for each of the three high, medium, and low pressure tanks. Moreover, in this study, for the first time, modeling priority panels and the best algorithm of priority panel of CNG refueling station were determined with the aim of minimizing energy consumption.

## 2. Modeling

A CNG refueling station consists of a compressor (usually three-stage), a priority panel, cascade storage tanks, communication pipes, a dispenser, and a vehicle tank. The fast filling process consists of the last four items. Figure 1 shows a view of a CNG refueling station with a cascade storage system.

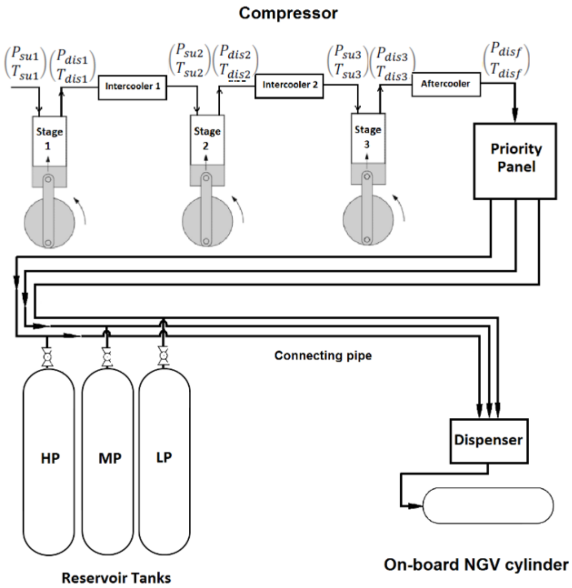



**Figure 1. A Schematic diagram of a CNG refueling station with a cascade storage system**

A view of the priority panel for a compressed natural gas refueling station is shown in Figure 2.

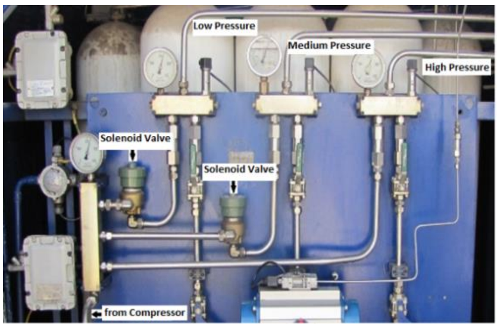



**Figure 2. A Schematic diagram of a priority panel for a CNG refueling station**

There is another algorithm in the dispenser whose task is to manage the evacuation of the station tanks and the filling of the vehicle tank.

[1]. Corresponding Author, Assistant Professor, Esfarayen University of Technology, Esfarayen, North Khorasan, Iran. Email: MSaadat@esfarayen.ac.ir
[2]. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
[3]. Professor, Mechanical Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

According to the algorithm, when the mass flow rate to the vehicle tank reaches a certain value (usually 0.02 kg/s), the vehicle tank is connected from the lower pressure tank to the higher pressure tank until the refueling process is completed. The AGA8 standard was used to determine the thermodynamic properties of natural gas in different stages of modeling. Using this method, the compressibility coefficient and density of natural gas can be calculated.

## 3. Results

One of the main objectives of this study is to simulate the performance of a CNG refueling station during several consecutive refueling processes. Determining the best priority panel algorithm is considered the most important goal and innovation of the present study. A summary of the results related to determining the optimal algorithm for filling storage tanks is presented in Figure 3. As can be seen in the summary of results, the lowest average value of specific energy consumption is related to the PPM225 algorithm and is equal to 0.2174 kWh/kg. According to this algorithm, the minimum allowable pressure for a high pressure tank is set to 220 bar. Moreover, the maximum pressure of the medium pressure tank is 225 bar.

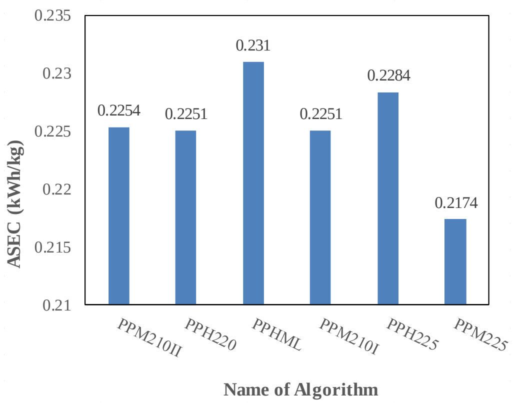



**Figure 3. Results for determining the optimal algorithm for the priority panel**

## 4. Conclusion

There are many researches concentrated on the thermodynamic modeling of CNG refueling station, but they have not addressed the optimal algorithm of priority panel. Filling time minimizing, filling mass maximizing, and average specific energy consumption minimizing were employed as the objective function for the optimization problem. Finally, the optimal algorithm of priority panel was determined as the main goal of the present study. The conclusive results of the optimization problem are presented. Achieving more accurate modeling and modeling the process of several consecutive refueling are the most important results of the present study. The optimal algorithm of priority panel is obtained for PPM225 algorithm. An economic analysis was performed to see the results more clearly. The results of the economic analysis show that 65,700,000,000 Rials (43,800,000 kWh) can be saved in one year.